

### ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ ЖРО СЛОЖНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ФГУП «ГХК»

П. М. Гаврилов, И. А. Меркулов, В. И. Мацеля, Д. В. Друзь  
ФГУП «Горно-химический комбинат», Железногорск, Красноярский край

Статья поступила в редакцию 23 января 2019 г.

*В статье изложен опыт ФГУП «ГХК» по обращению с жидкими радиоактивными отходами от переработки топлива уран-графитовых реакторов.*

**Ключевые слова:** жидкие радиоактивные отходы, переработка радиоактивных растворов, подземная закачка ЖРО, критерии приемлемости, щелочное концентрирование, ТБФ, ГХБД.

#### Введение

Горно-химический комбинат, как предприятие Министерства среднего машиностроения, создавался с целью наработки и выделения оружейного плутония. Основными производствами, задействованными в этом процессе с начала 60-х годов прошлого столетия и до 2013 года, были реакторный (РЗ), радиохимический и изотопно-химический заводы предприятия. С развитием производств и изменением требований к охране окружающей среды происходило совершенствование технологических процессов и оборудования. Так, на первом этапе, до 1967 года, все жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), образованные при радиохимической переработке облученного в реакторах РЗ ядерного топлива, локализовались в специальных емкостях-хранилищах объемом 3000 м<sup>3</sup>. Это было связано с неготовностью полигона подземной закачки ЖРО «Северный» к эксплуатации. В дальнейшем, после пуска полигона, были выработаны требования к удаляемому на захоронение в его горизонты растворам ЖРО. Проведенная в конце 70-х годов глобальная реконструкция технологической

цепочки радиохимического завода с заменой осадительных процессов на экстракционные принципиально обновила процессы разделения и очистки ценных компонентов и сделала их более безопасными. Это позволило увеличить коэффициент извлечения урана и плутония из ЖРО перед их захоронением.

#### Источники образования ЖРО

В соответствии со Ст. 3 Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» к радиоактивным отходам относятся, в частности, не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества. При эксплуатации реакторного и радиохимических производств образуются различные типы жидких отходов, которые подразделяются на технологические сбросы, генерирующиеся непосредственно технологическим процессом и нетехнологические сбросы, связанные со вспомогательными операциями. В данной статье будет рассмотрено обращение с технологическими ЖРО. Принципиальная схема обращения

с образующимися на предприятии технологическими ЖРО представлена на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема обращения с технологическими ЖРО

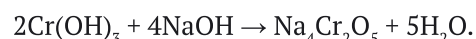
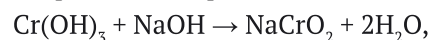
### Технологические ЖРО

Жидкие технологические отходы, при переработке облученных в промышленных реакторах стандартных урановых блоков (ОСУБ), формировались из большого ряда продуктов, в первую очередь, радиохимического производства. Первым этапом обращения с этими отходами было щелочное концентрирование целевых компонентов, таких как уран, плутоний и нептуний, с последующим выпариванием образующихся щелочных декантатов и растворением азотной кислотой полученного осадка для финишной экстракционной переработки. На операции щелочного концентрирования урана, плутония и нептуния поступали следующие жидкие отходы:

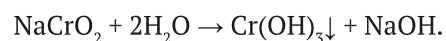
- оксалатные десорбаты и промывные воды узла сорбционной очистки азотнокислых растворов от растворения ОСУБ;
- рафинаты экстракционных циклов, промывные растворы от промывки экстрагента;
- сорбаты и промывные растворы из отделений сорбционного аффинажа плутония и нептуния, оксалатные фильтраты и декантаты от осаждения щавелевой кислоты плутония и нептуния;
- промывные азотнокислые растворы от отмывки оборудования и пульпы, растворы от переработки пульпы;
- дренажные растворы, конденсат из газоочистного оборудования.

Плутоний и нептуний при щелочном осаждении в присутствии сопутствующих тяжелых металлов Fe, Cr, Ni, Mn образуют труднорастворимые гидроксиды или основные соли  $Pu(OH)_4$ ;  $Pu(OH)_4 \cdot x \cdot H_2O$ . Уменьшению растворимости соединений плутония в щелочной среде способствует то, что при контакте с кислородом воздуха плутоний в твердой фазе окисляется

до шестивалентного состояния и в дальнейшем в процессе перекристаллизации образует смешанные кристаллы с натриевыми солями урана. В результате этого процесса растворимость соединений плутония в щелочной среде в присутствии солей урана очень мала и составляет десятки микрограмм в литре раствора. Выпадающие в щелочной среде осадки гидроксидов и солей тяжелых металлов являются хорошими сорбентами для микроколичества плутония, нептуния и для большинства продуктов деления, поэтому при щелочном осаждении, наряду с концентрированием урана за счет соосаждения, идет и концентрирование плутония, нептуния и гидролизующихся радионуклидов. Степень концентрирования ценных компонентов и продуктов деления при щелочном осаждении достигает 30–40. Концентрирование ценных компонентов и продуктов деления проводили методом обратного щелочного осаждения при температуре  $(90 \pm 5)^\circ C$  при постоянном перемешивании реакционного объема барботажным воздухом. Обратное щелочное осаждение дает возможность получать плотные и быстрооседающие осадки. Образование компактных осадков при обратном осаждении объясняется тем, что в раствор гидроксида натрия в единицу времени подается незначительное количество тяжелых металлов: Fe, Cr, Ni, U, содержащихся в исходном растворе, что приводит к образованию малого количества центров кристаллизации и росту крупных отдельных агрегатов. Уменьшение степени пересыщения благоприятствует образованию крупных частиц диураната натрия. При обратном осаждении образованию кристаллических осадков гидроксидов способствует также явление полимеризации молекул гидроксидов, которое ускоряется с повышением щелочности раствора. Необходимо отметить различное поведение хрома при прямом и обратном осаждениях. При прямом осаждении образуется аморфный осадок гидроксида хрома, который склонен при длительной выдержке к «старению». При обратном осаждении, когда соли хрома попадают в горячую концентрированную щелочь, образующиеся осадки гидроксида хрома сразу же растворяются с образованием хромитов по реакциям:



В дальнейшем, в процессе снижения щелочности среды, происходит гидролиз хромитов с образованием гидроксида хрома по реакции:



Поэтому при процессах обратного осаждения хром осаждается фактически при больших значениях степени пересыщения, в результате чего образуются аморфные осадки, причем, если диуранаты и гидроксид железа осаждаются

одновременно, то гидроксид хрома осаждается позднее первых и образует самостоятельный осадок.

Железо при обратном щелочном осаждении, как правило, образует компактные осадки, однако при увеличении концентрации железа образуются не кристаллические, а аморфные осадки, и уплотнение пульпы не наблюдается. Примеси солей марганца (II) в исходном растворе не влияют на уплотнение пульпы, так как гидроксид марганца (II) выпадает в осадок. Но при контакте с кислородом воздуха, подаваемого на перемешивание, марганец (II) окисляется до марганца (IV) и образует соединение  $MnO_2 \cdot nH_2O$ . Диоксид марганца — это аморфное, с развитой поверхностью вещество, которое захватывает взвеси, осаждается на стенках и арматуре аппарата и образует коллоиды. Поэтому отстаивание растворов с большой концентрацией марганца происходит очень медленно. Для увеличения скорости отстаивания этих растворов необходимо было увеличивать концентрацию урана в исходном растворе.

Перерабатываемые урановые блоки имели алюминиевую оболочку, поэтому в рафинатах первого экстракционного цикла содержалось некоторое количество алюминия. При щелочном осаждении при избытке NaOH значительная часть алюминия оставалась в декантате в виде алюмината натрия. В случае осаждения гидроксид алюминия дает неплотный рыхлый осадок. С целью более полного перевода алюминия в декантат производилась обработка осадка горячим раствором гидроксида натрия (операция щелочной разварки).

Образующиеся при щелочном осаждении осадки гидроксидов тяжелых металлов Fe, Cr, Ni и диураната натрия обладают высокой адсорбционной способностью и захватывают из раствора отдельные осколочные элементы. Величина захвата зависит от pH среды, концентрации солей в растворе и природы осколочного элемента. В случае цезия величина сорбции на осадке гидроксидов мала, поэтому при щелочном концентрировании цезий практически нацело остается в растворе. Сорбция стронция зависит от щелочности среды (с повышением щелочности среды захват стронция гидроксидными осадками увеличивается) и составляет не менее 95 %.

Цирконий, в силу своих химических свойств, хорошо соосаждается в щелочной среде с осадками гидроксидов тяжелых металлов. В интервале pH = 7–9 ниобий также количественно захватывается гидроксидными осадками, однако повышение щелочности раствора вызывает образование растворимого ниобата и вывод ниобия в декантат.

Значительную долю радионуклидов в растворах, поступавших на щелочное осаждение, составляли редкоземельные элементы ( $^{141}Ce$ ,  $^{144}Ce$ ,

$^{147}Pm$ ,  $^{144}Pr$  и др.), сорбция которых на гидроксидных осадках различна, однако при pH = 9,5 и температуре среды в процессе выше 90 °C редкоземельные элементы практически полностью захватываются осадками гидроксидов хрома, железа и диураната натрия. В случае переработки растворов с низким содержанием ценных компонентов и примесей для улучшения условий осаждения производилось дополнительное дозирование уранового раствора.

Концентрация трибутилфосфата (ТБФ), гексахлорбутадиена (ГХБД) и продуктов их разложения в водных растворах, поступавших на щелочное осаждение, определялась их растворимостью. Однако отмечалось попадание органических продуктов сверх растворимого количества за счет микроэмульсий или механического уноса органической фазы при отклонениях технологического процесса. Присутствие избыточного количества органической фазы несколько осложняло проведение процесса щелочного концентрирования. При проведении осаждения отмечалось небольшое вспенивание и снижение скорости отстаивания осадка за счет «зависания» капель экстрагента по высоте аппарата. Объем гидроксидного осадка в присутствии 1 % (об.) экстрагента увеличивался в среднем в 1,2 раза. За счет взаимодействия плутония с дибутилфосфорной кислотой (ДБФК) и образования устойчивых эмульсий в присутствии гидроксидных осадков, концентрация ТБФ в щелочном декантате достигала 100 мг/л, концентрация плутония в декантате достигала 0,2 мг/л. Содержание урана в декантате не зависело от наличия экстрагента в исходных растворах.

При осаждении растворов, насыщенных экстрагентом, более 90 % ТБФ оставалось в декантате, при осаждении растворов, содержащих механически унесенный экстрагент в концентрации 0,2–1 % (об.), осадком захватывалось 60–90 % ТБФ. Содержание ДБФК в декантате зависело от содержания экстрагента в исходном растворе. Если в исходном растворе содержание ТБФ не превышало предела растворимости, то ДБФК в основном выводился с декантатом. При увеличении экстрагента в исходном растворе до 1 % (об.) содержание ДБФК в декантате уменьшалось до 70 %. Монобутилфосфорная кислота (МБФК) при щелочном осаждении на 80–95 % переходит в декантат. Гексахлорбутадиен при щелочном концентрировании при 95–100 °C на 90–95 % отгонялся с парогазовой фазой.

Переработка растворов с содержанием экстрагента в пределах растворимости не вызывала затруднений. В этом случае объем осадка и продолжительность отстаивания не увеличивались, ТБФ практически нацело выводился с декантатом и при растворении осадка отдельная фаза не образовывалась. Присутствие в значительном количестве ДБФК приводило к повышенному содержанию плутония в щелочном декантате.

В качестве технологического приема повышения скорости коалесценции органических микроэмульсий использовали добавление в исходные растворы пероксида водорода перед операцией щелочного концентрирования. Для снижения концентраций ТБФ и ГХБД исходные растворы, кроме других технологических приемов, подвергали нагреванию до 85–95 °С с последующей выдержкой при перемешивании в течение не менее трех часов. В этом случае ГХБД отгонялся практически нацело, а ТБФ — приблизительно на 60 %.

Особое место среди прочих продуктов деления занимает рутений ( $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ). Это единственный элемент, который обнаруживает все возможные степени окисления и может иметь сходство с металлами всех групп. Захват рутения осадками гидроксидов железа, хрома и диураната натрия в высокой степени зависит от окислительно-восстановительного потенциала, pH среды и температуры. Как правило, величина захвата рутения осадками гидроксидов металлов изменяется от 10 до 100 % от начального содержания его в растворе. Наиболее оптимальными условиями, поддерживаемыми в технологическом процессе для наиболее максимального захвата рутения, являются: осаждения гидроксидов железа, хрома и диураната натрия при температуре около 100 °С без избытка окислителей и при  $\text{pH} < 9,5\text{--}10$ .

При переработке ОСУБ с малым временем выдержки отмечалось попадание на операцию щелочного концентрирования незначительного количества радиоактивного йода. Понижение pH среды несколько улучшало сорбцию радио-йода, доводя ее в лучшем случае до 10 % по отношению к содержанию в исходном растворе.

Выпаривание щелочных декантатов производилось для уменьшения до четырех раз объема среднеактивных жидких отходов, направляемых на подземное захоронение, при этом в декантатах повышалась концентрация радиоизотопов и нитрата натрия. Во избежание загрязнения конденсата вторичного пара крайне важно обеспечивать поддержание технологических режимов выпаривания. Коэффициент очистки ( $K_{\text{оч}}$ ) конденсата вторичного пара значительно снижался за счет следующих факторов: уноса капель, пенообразования, а также летучести радионуклидов. Величина уноса зависела, в основном, от скорости удаления вторичного пара из зоны кипения и размера капель. Снижение скорости удаления вторичного пара реализовано конструктивно — выпарной аппарат снабжен сепаратором. Однако унос может значительно увеличиваться при резком повышении скорости парообразования, связанном с изменением разрежения в выпарном аппарате, при поступлении в сепаратор раствора с температурой выше температуры кипения, а также при высокой интенсивности кипения раствора, что не допускалось в том числе средствами автоматизации.

Пенообразование, причиной которого являлось наличие органических веществ, взвесей или растворенных газов, может значительно уменьшить  $K_{\text{оч}}$  за счет повышения уровня жидкости в выпарном аппарате вследствие уменьшения объема сепарации и образования стабильных пузырьков, уносимых совместно с паровым потоком. Основным методом борьбы с пенообразованием — снижение содержания экстрагента в растворах, направляемых на переработку, что было реализовано достаточным количеством технологических и предупредительных организационных мер. Летучесть присутствующих в растворах рутения, йода и органических соединений йода в процессе выпаривания потенциально могла увеличить выбросы радионуклидов в окружающую среду. Кардинальное уменьшение летучести рутения и йода было обеспечено поддержанием окислительно-восстановительного потенциала среды в выпарном аппарате. При выпаривании щелочных декантатов, содержащих следы экстрагента, ТБФ и ГХБД полностью отгонялись с парогазовой фазой, а в кубовом остатке наблюдалось образование аморфных легкоотстаивающихся осадков (в объеме 0,15–0,20 % от объема упаренного раствора), основу которых составляли диоксид кремния, соединения алюминия, а также соединения продуктов коррозии выпарного оборудования с ДБФК, МБФК.

Перевод щелочных осадков в раствор производился путем растворения их в азотной кислоте. При этом шестивалентные уран, плутоний и нептуний образовывали соединения, соответственно,  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{NpO}_2(\text{NO}_3)_2$ , четырехвалентный плутоний —  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ , пятивалентный нептуний —  $\text{NpO}_2\text{NO}_3$ . Большинство элементов образовывали нитратные соли, а железо, никель, хром, марганец (IV) — оксиды металлов, кремний — гель кремниевой кислоты, на основе которого образуются полимерные комплексные соединения. Полученный от растворения осадка азотнокислый раствор направляли на предварительную выдержку и последующую экстракционную переработку.

При растворении осадка, содержащего ТБФ и ГХБД, в азотной кислоте происходило разделение фаз, при этом основная часть экстрагента собиралась на дне аппарата и частично на стенках в виде капель. До 50 % урана и плутония захватывалась экстрагентом, что вызывало трудности при последующей переработке и хранении полученных концентратов. При эксплуатации технологического оборудования приходилось учитывать тот факт, что ГХБД под действием ионизирующего излучения подвергается радиационно-химическому окислению с выделением атомарного хлора, а затем соляной кислоты, что требовало применения ряда технологических приемов и ограничений с целью исключения коррозии оборудования.



### Переработка пульп

В процессе выдержки упаренных щелочных растворов перед подземным захоронением в емкостях-хранилищах происходит формирование гидроксидных пульп, которые имеют сложный состав и в основном состоят из гидроксидов железа, алюминия, хрома, никеля, кальция, оксида марганца и кремниевой кислоты. В процессе эксплуатации емкостей в пульпах происходит концентрирование радионуклидов вследствие гидролиза и сорбционных процессов. Горно-химический комбинат занимается решением вопросов освобождения емкостей-хранилищ вместимостью до 3200 м<sup>3</sup> от радиоактивных пульп и их переработкой. Переработка пульп заключается в их последовательном растворении азотной кислотой и гидроксидом натрия совместно с восстановительными и комплексообразующими реагентами. Основной задачей переработки является уменьшение объема пульпы, извлечение основной части урана, плутония, радионуклидов <sup>90</sup>Sr, <sup>144</sup>Ce, <sup>137</sup>Cs и дезактивация нерастворимого остатка. Применение различных восстановительных и комплексообразующих реагентов при нагревании обеспечивает эффективное растворение частично дегидратированных гидроксидов металлов и полимеризированной кремниевой кислоты. Осветленный азотнокислый раствор от переработки пульп направлялся на экстракционную переработку совместно с «хвостовыми» растворами.

**Таблица 1. Усредненный состав азотнокислого раствора от переработки пульп из емкостей-хранилищ (без учета содержания урана и плутония)**

Компонент	Единица измерения	Значение
Нептуний	мг/л	1–5
Америций-241	мг/л	0,020–0,035
Торий	мг/л	2–5
Азотная кислота	г/л	50–60
Удельная бета-активность	Ки/л	0,7–1,5
Стронций-90	Ки/л	0,3–0,6

### Экстракционная переработка «хвостовых» растворов

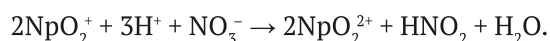
Азотнокислый раствор от растворения щелочного осадка перед дальнейшей переработкой выдерживали в емкостях рабочим объемом 300 м<sup>3</sup>. После чего производили экстракционное извлечение урана, нептуния и плутония из растворов, а полученные рафинаты, после приведения их в соответствие критериям приемлемости, направляли на подземное захоронение. Технологическая схема переработки включала в себя следующие этапы:

- сорбционная очистка исходного раствора от радиационного и радионийного путем фильтрования через силикагелевый фильтр;

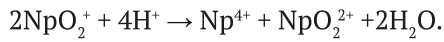
- экстракционное извлечение урана, нептуния и плутония;
- отстаивание рафината первого экстракционного цикла для отделения органической фазы, отгонка ГХБД водяным паром;
- окончательное приведение раствора в соответствие критериям, установленным для захоронения, путем нейтрализации азотной кислоты гидроксидом натрия и разбавления;
- перекачка полученного кондиционного продукта в ПГЗ ЖРО.

Переработку хвостовых растворов проводили, как правило, ежегодно. Для этого выполняли ряд работ по изменению аппаратурной схемы и дополнительной подготовке технологических продуктов. При подготовке продуктов для экстракционной переработки необходимо было учитывать особенности поведения урана, плутония и нептуния в разных валентных формах. Например, то, что экстрагируемость указанных элементов в шестивалентном состоянии снижается в ряду U > Np > Pu, в четырехвалентном состоянии — в ряду Pu > Np > U, а экстрагируемость урана различной валентности повышается в ряду U<sup>(IV)</sup> < U<sup>(VI)</sup>; плутония — Pu<sup>(III)</sup> << Pu<sup>(IV)</sup> < Pu<sup>(VI)</sup>; нептуния — Np<sup>(V)</sup> << Np<sup>(IV)</sup> < Np<sup>(VI)</sup>, поэтому основная задача процесса регулирования валентного состояния U, Pu и Np в водном растворе перед экстракцией — перевод плутония и нептуния (в случае вывода отдельным потоком) в наиболее экстрагируемые формы Pu<sup>(IV)</sup> и Np<sup>(VI)</sup>.

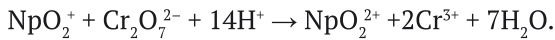
В азотнокислых растворах нептуний может существовать в различных валентных формах: Np<sup>(IV)</sup>, Np<sup>(V)</sup>, Np<sup>(VI)</sup>, соотношение между которыми зависит от ряда факторов. Перевод нептуния из наиболее устойчивого пятивалентного состояния в наиболее экстрагируемую форму Np<sup>(VI)</sup> осуществлялся с помощью бихромата натрия и азотной кислоты. Окисление Np<sup>(V)</sup> азотной кислотой в присутствии следов азотистой кислоты, которая образуется за счет радиолитического распада азотной кислоты, протекает по реакции:



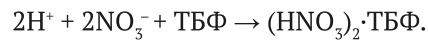
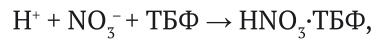
Поскольку реакция является обратимой, то процесс перевода Np<sup>(V)</sup> в Np<sup>(VI)</sup> проводили в двухфазной системе. В этом случае, вследствие перехода Np<sup>(VI)</sup> в фазу ТБФ, равновесие реакции смещается в правую сторону. Для исключения обратной реакции в зонах экстракции и промывки необходимо поддерживать концентрацию азотной кислоты не менее 3 моль/л. В случае двухзонной промывки экстракта (сильнокислотной и слабокислотной) происходит накопление нептуния в водной фазе в зоне слабокислотной промывки, при однозонной промывке при концентрации азотной кислоты не менее 3 моль/л накопление нептуния в первом блоке не происходит. Также в азотнокислых растворах имеет место реакция диспропорционирования пятивалентного нептуния:



Причем степень диспропорционирования и скорость реакции увеличивалась с ростом кислотности. Бихромат натрия быстро и полностью переводит Np(V) в Np(VI) по реакции:



И в данном случае сдвигу равновесия в сторону образования Np<sup>(VI)</sup> способствовало повышение кислотности среды, а также проведение процесса окисления в двухфазной системе, вследствие перехода Np<sup>(V)</sup> в фазу ТБФ. Раствор бихромата натрия можно вводить в исходный водный раствор, однако более высокие коэффициенты извлечения нептуния достигались при введении окислителя непосредственно в зону экстракции или в зону сильнокислотной промывки. Азотная кислота, присутствующая в водном растворе, экстрагировалась трибутилфосфатом с образованием соединений:



Последняя реакция имеет место при концентрации азотной кислоты в водной фазе более 5 моль/л. По мере повышения концентрации азотной кислоты до 6 моль/л коэффициенты распределения урана, плутония и нептуния увеличиваются вследствие повышения общей концентрации нитрат-иона. При концентрации азотной кислоты в водной фазе более 6 моль/л коэффициенты распределения урана, плутония и нептуния снижаются, так как в этих условиях увеличивается экстрагируемость азотной кислоты. Использование вышеуказанных химических свойств выделяемых компонентов, а также применение ряда технологических приемов в дальнейших операциях, позволяло получать растворы, соответствующие требованиям для безопасного захоронения.

**Таблица 2. Результат переработки «хвостовых» растворов**

Анализируемый компонент	Единица измерения	До экстракционной переработки	После переработки
Плутоний	мг/л	40–80	0,03
Уран	г/л	35–70	0,01
Азотная кислота	г/л	77–130	7,4
Нептуний	мг/л	10–20	0,7
Торий	мг/л	7,5–16,0	1,5
Алюминий	г/л	0,05–1,40	0,02
Никель (II)	г/л	1,35–3,00	0,136
Удельная β-активность	Бк/кг	$3,8 \cdot 10^{11}$ – $1,8 \cdot 10^{12}$	$1,9 \cdot 10^{10}$
Диоксид кремния	мг/л	до 250	40,9
Фосфор общий	мг/л	10–95	2,6
Железо (III)	г/л	1,5–3,0	0,16
Марганец (II)	г/л	0,6–1,4	0,07
Хром (III)	г/л	0,005–0,340	0,04
Стронций-90	Бк/кг	$1,1 \cdot 10^{11}$ – $2,1 \cdot 10^{11}$	$5,3 \cdot 10^9$
Америций-241	мг/л	0,007–0,38	0,016
Трибутилфосфат	мг/л	≤17	9,7
Хлорид-ион	мг/л	115–200	17,1

## Заключение

В статье кратко описан накопленный опыт ФГУП «ГХК» по обращению с растворами сложного химического состава, образовавшимися при переработке ОСУБ промышленных уран-графитовых реакторов. Затронут ряд проблемных вопросов, связанных с особенностями поведения различных химических элементов на основных технологических этапах процесса переработки. По результатам статистической обработки результатов измерений приведены основные данные по составам как промежуточных, так и конечных продуктов переработки.

Использованные на ФГУП «ГХК» технологические приемы обращения с ЖРО различных уровней активности позволили исключить превышения допустимых значений загрязняющих компонентов в разрешенных источниках сбросов в открытую гидрографическую сеть, а также обеспечили соответствие критериям приемлемости растворов, направляемых на подземное захоронение.

## Информация об авторах

*Гаврилов Петр Михайлович*, доктор технических наук, генеральный директор, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат» (662972, Россия, Красноярский край, Железногорск, ул. Ленина, д. 53), e-mail: atomlink@mcc.krasnoyarsk.su.

*Меркулов Игорь Александрович*, главный инженер, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат» (662972, Россия, Красноярский край, Железногорск, ул. Ленина, д. 53), e-mail: atomlink@mcc.krasnoyarsk.su.

*Мацеля Владимир Иванович*, начальник отдела производственно-технического управления, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат» (662972, Россия, Красноярский край, Железногорск, ул. Ленина, д. 53), e-mail: atomlink@mcc.krasnoyarsk.su.

*Друзь Дмитрий Витальевич*, главный специалист отдела обучения и развития предприятия, Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат» (662972, Россия, Красноярский край, Железногорск, ул. Ленина, д. 53), e-mail: atomlink@mcc.krasnoyarsk.su.

### Библиографическое описание статьи

Гаврилов П. М., Меркулов И. А., Мацеля В. И., Друзь Д. В. Опыт и проблемы переработки ЖРО сложного химического состава ФГУП «ГХК» // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 62—68.

---

## EXPERIENCE AND ISSUES OF REPROCESSING LIQUID RADIOACTIVE WASTE OF COMPLEX CHEMICAL COMPOSITION AT FSUE “MCC”

Gavrilov P. M., Merkulov I. A., Matselya V. I., Druz D. V.

FSUE “Mining and Chemical Combine”, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, Russia

Article received 23 January 2019

*The article describes FSUE “MCC” experience in handling liquid radioactive waste of fuel reprocessing received from uranium-graphite reactors.*

**Keywords:** *liquid radioactive waste, reprocessing of radioactive solutions, LRW underground injection, acceptance criteria, alkaline concentration, TBP, hexachlorobutadiene.*

---

### Information about authors

*Gavrilov Petr Mikhailovich*, Doctor of Engineering Science, Director General of an enterprise, Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Combine” (53, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662972, Russia), e-mail: [atomlink@mcc.krasnoyarsk.su](mailto:atomlink@mcc.krasnoyarsk.su).

*Merkulov Igor Aleksandrovich*, Chief Engineer of an enterprise, Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Combine” (53, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662972, Russia), e-mail: [atomlink@mcc.krasnoyarsk.su](mailto:atomlink@mcc.krasnoyarsk.su).

*Matselya Vladimir Ivanovich*, Head of the Office, Technical Management Department, Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Combine” (53, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662972, Russia), e-mail: [atomlink@mcc.krasnoyarsk.su](mailto:atomlink@mcc.krasnoyarsk.su).

*Druz Dmitry Vitalyevich*, Senior Specialist, Department for Education and Business Development, Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Combine” (53, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Region, 662972, Russia), e-mail: [atomlink@mcc.krasnoyarsk.su](mailto:atomlink@mcc.krasnoyarsk.su).

### Bibliographic description

Gavrilov P. M., Merkulov I. A., Matselya V. I., Druz D.V. Experience and Issues of Reprocessing Liquid Radioactive Waste of Complex Chemical Composition at FSUE “MCC”. *Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 62—68. (In Russian).